單斜式溫室表面風壓之風洞試驗與數值模擬

朱佳仁、藍廷維、蔡仁凱
國立中央大學土木工程學系

一、摘要

本研究利用風洞實驗及計算流體動力學模式研究單斜式溫室的表面風壓，以作為溫室結構耐風及通風設計之用。數值模式模擬之結果十分接近風洞實驗量測之風壓係數。且研究結果顯示：溫室迎風面風壓不受溫室縱深的影響，但縱深短的單棟溫室背風面的負風壓較長縱深的連棟溫室背風面的負風壓大，且連棟溫室屋頂的最大負壓發生於的第二棟溫室屋頂處，風向為180度時屋頂的負風壓大於風向為0度時屋頂的負風壓，設計溫室結構的抗風強度時必須注意其風壓係數之變化。

關鍵字：單斜式溫室，表面風壓，計算流體動力學模式，風洞實驗

二、前言

臺灣地處西太平洋颱風區，風災頻繁，農業設施常受颱風之強風吹襲而損壞。因此設計農業設施，必須考量溫室結構所承受的風壓分布以及風力負載。但溫室外部的風壓力隨著溫室外型、風速、風向而有所不同，往往需要藉由風洞實驗量測而得。此外，溫室的通風可藉由室內、室外的壓差造成空氣的流動，進而影響溫室內部的溫度、濕度分布。因此溫室的環境控制中，通風的控制為其中重要的一項。換言之，溫室與風相關的問題有兩類，第一為溫室結構設計時，需要知道強風來襲時溫室的風力負載；第二類為平時，以自然風場的風力，造成溫室的通風，有利於作物的生長。這兩類的問題皆需要瞭解溫室內外的風場，而溫室風場、熱量及質量的傳輸現象的研究可採用現地量測、風洞實驗和計算流體動力學模式等方式，各有其優缺點，以下分述之。

若針對一棟真實的溫室在現地監測其內外的氣候狀況是瞭解溫室微氣候最直接的方式，所獲得量測數據是最具說服力，故以往大多數的溫室實驗都是在現地進行。但現地量測的缺點是會影響溫室氣候條件的因素太多，譬如風速、風向、輻射、氣溫、濕度等氣象參數與時俱變，需要在溫室內外多點設置儀器同時且長時間監測，因此需要的經費較高。且其結果隨著溫室的型式及開口而不同。換言之，影響溫室氣候狀況的因素太複雜，往往不易由現地監測數據深入瞭解溫室微氣候的主要機制及關鍵參數。

計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模式乃是將計算域內的空間格網化，依據連續方程式(Continuity eqn.)、那維爾–史托克(Navier-Stokes eqns.)方程式、熱傳方程式(Heat transfer eqn.)及擴散方程式(Diffusion eqn.)，配合適當的邊界和初始條件，利用數值方法計算各個網格點上的風速、溫度、濕度及其他物質的濃度等。此法的優點為可以計算出整個流場的細部變化，且所需經費低於現地監測與風洞實驗，因此廣泛應用於各種風場問題。

但CFD的缺點為模式複雜，且計算量大，需要大量的計算資源(電腦容量、記憶空間)。且模式的計算結果會受到數值模式的設定的影響，譬如紊流模式、模式參數計算範圍、網格大小、邊界和初始條件、收斂標準等因素。若設定參數不正確，往往得到似是而非的模擬結果，因此計算結果必須與相同流況之實驗數據嚴謹地比對，以確保CFD計算結果的正確性，方能應用於各種溫室內外風場之模擬(Tominaga et al., 2008; Chu et al., 2017)。國外已有許多個應用計算流體動力學(CFD)模式計算溫室通風的研究，譬如Reichrath& Davies (2002)，Norton et al. (2007)及Bournet&Boulard (2010)等完整地回顧了應用CFD於溫室微氣候的研究之相關論文。

風洞實驗的優點是控制性佳，可重複性高，可以在風洞實驗室內，針對特定的溫室建築，製作縮尺模型，在恆定的風速、風向下，控制流場參數來進行一系列的實驗，以瞭解來流場參數對溫室風壓、通風量的影響，做學理上的探討(Chu et al., 2009)。且儀器設備量測較精準，因此量測得之數據可供數值驗證之用。但風洞實驗的缺點是儀器設備較昂貴，並非每個大學、研究單位皆有。

三、材料與方法

本研究利用中央大學土木工程系的大型環境風洞(見圖1)來研究溫室內外的風場，此風洞全長30 m，試驗段長18.5 m，寬3.05 m，高2.1 m，最高風速可達20 m/s。溫室模型以透明的壓克力板製成，模型縮尺比 1:20，高度0.20 m，寬度1.0 m，深0.40 m，如圖2所示。同一外型的溫室模型共三個，一個無開口(密閉)模型，溫室模型表面設有壓力孔，可量外牆風壓。兩個有開口模型，可量測室內風速。三個模型可分開使用，量測單棟之風速、風壓；亦可併在一起量測二連棟或三連棟之風速、風壓。模型放置於風洞試驗段的轉盤上，可轉動轉盤模擬不同風向角度下的狀況。

本研究利用風洞實驗探討溫室的表面風壓與室內外風場，模型前方的試驗段鋪設粗糙元、渦流產生器及阻牆以加速邊界層流之發展。量測方法採用皮托管來量測遠離建築物處的參考風速，使用定溫式熱線流速儀(IFA300, TSI Inc.)和二維X-type探針量測量測風洞內的紊流風速，使用一台多頻道高頻率電子壓力掃瞄計(ZOC33/64PX, Scanivalve Inc.)量測建築物的表面風壓。實驗時，壓力模組放入建築物模型內部，壓

力管線是由內徑1.0 mm PVC管連接模型量測點至壓力模組上的壓力輸入埠，壓力模組再接入電子式壓力掃瞄器。

量測得之溫室表面壓力可計算無因次之壓力係數(Pressure coefficient)：

$$C_p = \frac{\overline{P} - P_o}{0.5\rho U_H^2} \quad (1)$$

式中 $\overline{P}$ 為模型表面的時間平均壓力，P_o為參考壓力，U_H為屋頂高度處的風速，ρ為空氣密度。

圖 1.中央大學環境風洞之影像圖

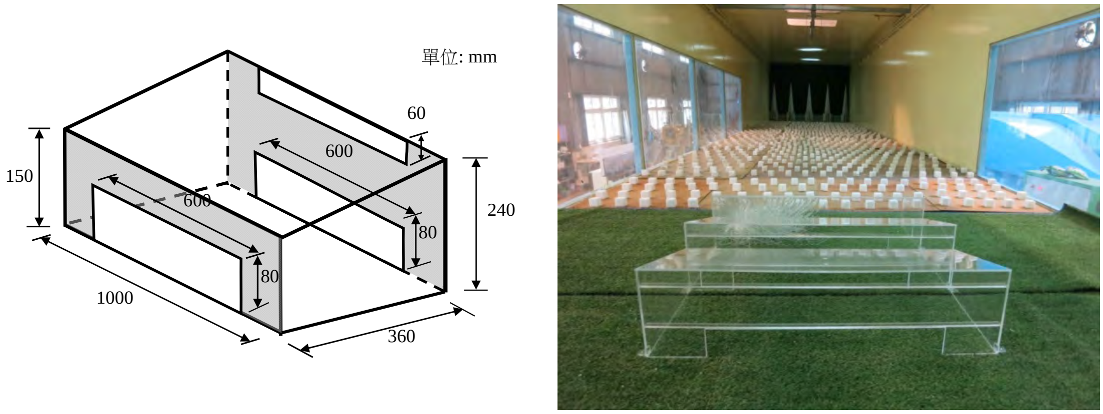

圖2.單斜式溫室之影像圖與示意圖

四、結果與討論

地表的風場屬於邊界層流，故風洞實驗中溫室前方的來流流場必須接近真實的風場。圖3為風洞內來流的時間平均風速及紊流強度剖面，邊界層厚度= 1.55 m，指數n= 0.20。在模型屋頂(H = 0.24 m)處的風速U_H = 7.2 m/s，紊流強度I_u = 21.8%、I_w = 12.0%，顯示入流流況為紊流邊界層流。

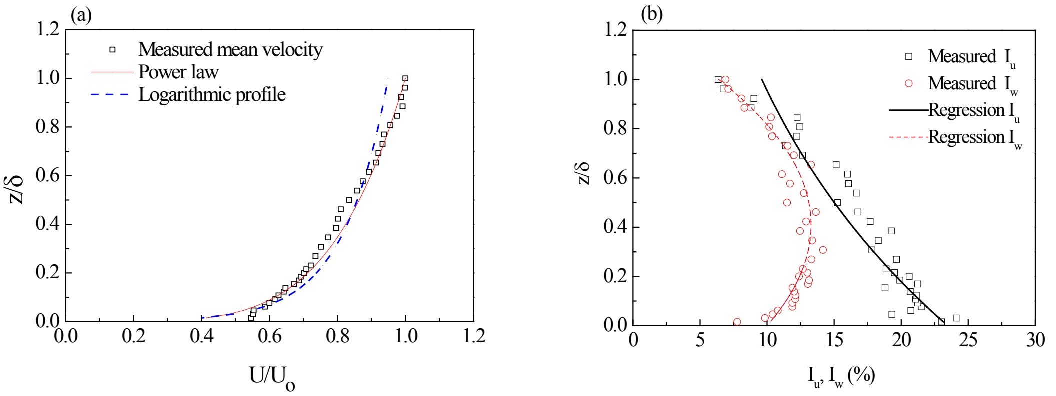

圖 3.風洞中邊界層流之垂向剖面圖(a)時間平均風速；(b)紊流強度

單棟單斜式溫室計算網格如圖4所示，最小網格集中於溫室周圍之區域，遠離溫室之處計算網格逐漸變大。圖5為在風向角 = 0^{o}(風向垂直於屋脊)，單棟溫室內部中心線的水平向風速剖面圖，此圖顯示CFD模式預測與實驗結果相近，但接近地面處風速CFD預測略小於實驗結果。圖6為在風向角 = 0^{o}單棟單斜式溫室中心線上外牆及屋頂的時間平均風壓係數，由此圖可看出迎風面牆的風壓為正壓，風壓係數C_p介於0.40 ~ 0.70之間；迎風面屋頂的風壓係數為負值，風壓係數介於C_p= -0.10 ~ -0.50之間；背風面牆的風壓係數亦為負值，風壓係數介於-0.40 ~ -0.50之間。除了迎風面牆CFD預測之風壓略大於實驗結果，迎風面屋頂以及背風面牆風壓預測結果均與實驗結果相近。

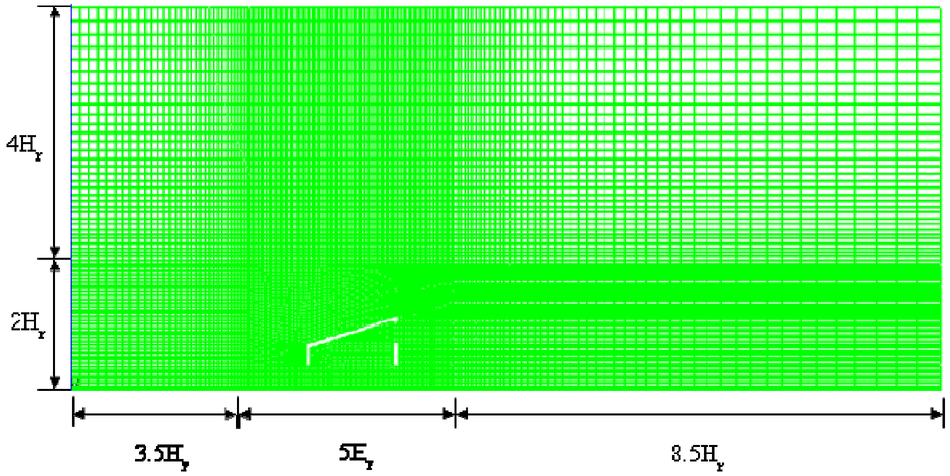

圖 4.單斜式屋頂溫室計算網格之側視圖

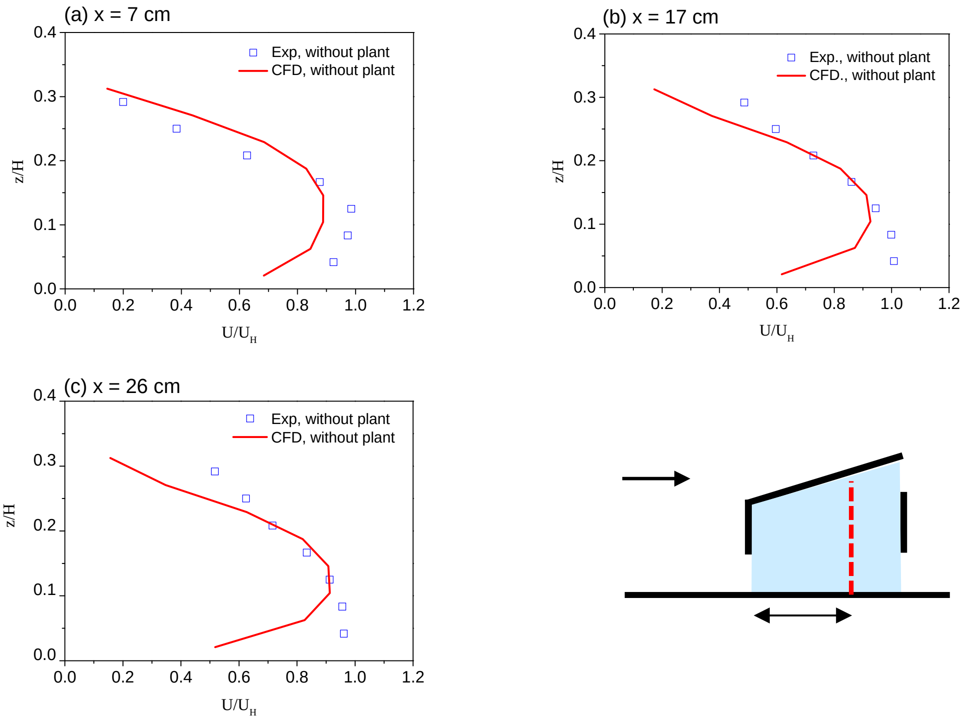

圖5.單棟單斜溫室在風向角= 0^o溫室內部風速剖面 (a) x = 7 cm；(b) x = 17 cm；(c) x = 26 cm.

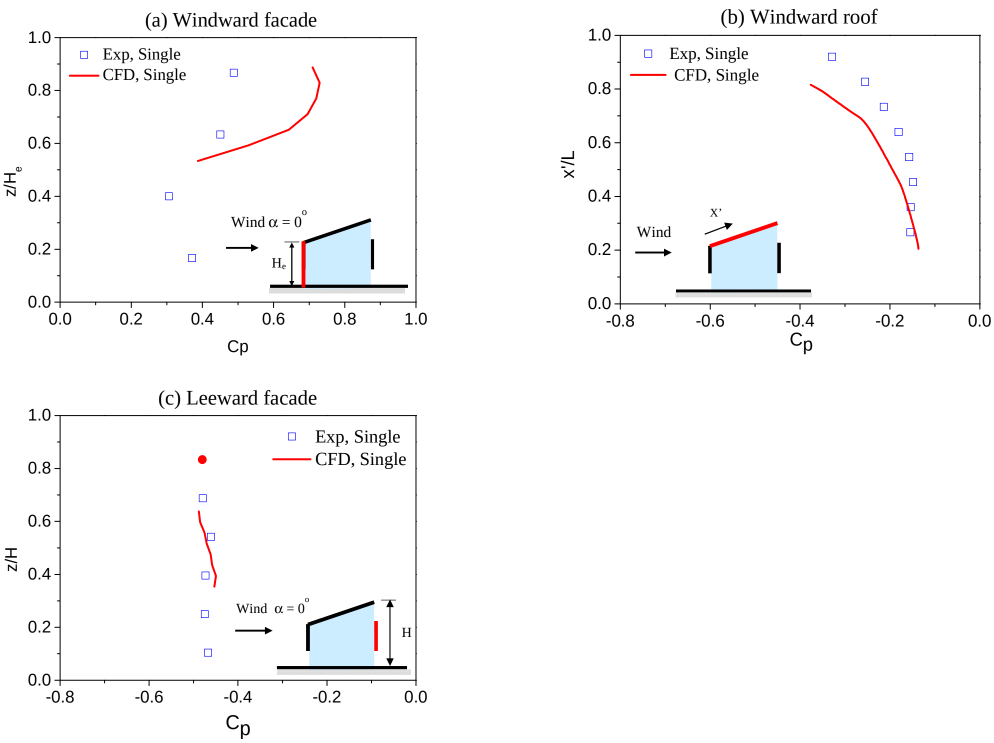

圖 6. 風向角= 0^o 單棟單斜式溫室中心線上牆面與屋頂的時間平均風壓係數 (a)迎風面牆；(b)迎風面屋頂；(c)背風面牆

圖7為在風向角 = 0^o和180^o雙棟單斜式溫室屋頂的時間平均風壓係數，由此圖可看出：風向角180^o溫室屋頂的風壓係數屋頂的負值大於風向角0^o溫室屋頂的風壓係數。且數值模式預測結果與實驗結果相近。圖8單斜式溫室中心線上時間平均風壓係數分佈，風向角0^o時迎風面第二棟溫室屋頂負風壓大於第一棟與第三棟的負風壓，且三連棟溫室，在風向角180^o時的負壓力大於風向角0^o時負壓力，設計溫室結構的抗風強度時必須注意其風壓係數之變化。

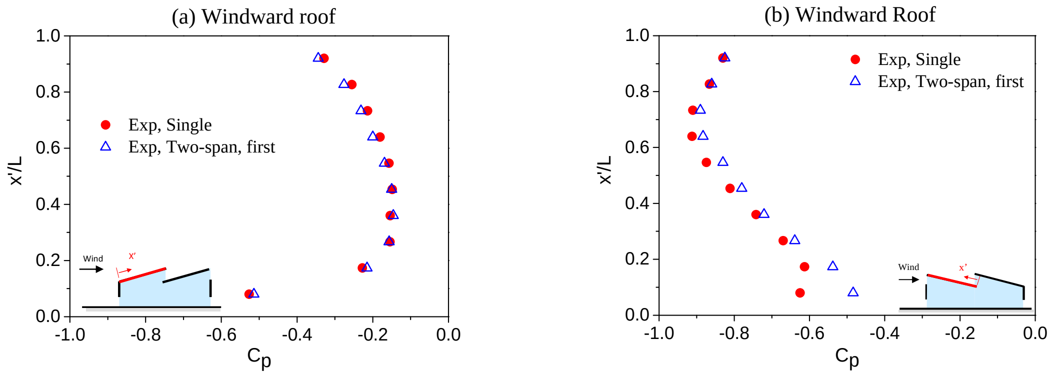

圖 7. 雙棟單斜式溫室中心線上迎風面屋頂的時間平均風壓係數
(a)風向角 = 0^o；(b)風向 = 180^o

五、結論

臺灣地處西太平洋颱風區，風災頻繁，農業設施常受颱風之強風吹襲而損壞，因此在設計農業設施、溫室的結構強度時必須考量其風力負載。而溫室的通風往往會影響溫室內部的溫度、濕度以及作物的生長。本論文採用計算流體動力學CFD模式與風洞實驗來探討連棟單斜式溫室的表面風壓，結果顯示：CFD與風洞實驗所得之溫室內部風速、外部風壓皆十分相近。且溫室表面風壓隨著溫室外型、風向而變。研究成果亦發現：迎風面壓力值與溫室長度無關，但單棟、短縱深溫室背風面的負風壓較長縱深的多跨度、連棟溫室背風面的負風壓大，且連棟溫室屋頂的最大負壓發生於的迎風面第二棟溫室屋頂處，風向角為 =180度時屋頂的負風壓大於風向角為0度時屋頂的負風壓，設計溫室結構的抗風強度時必須注意其風壓係數之變化。

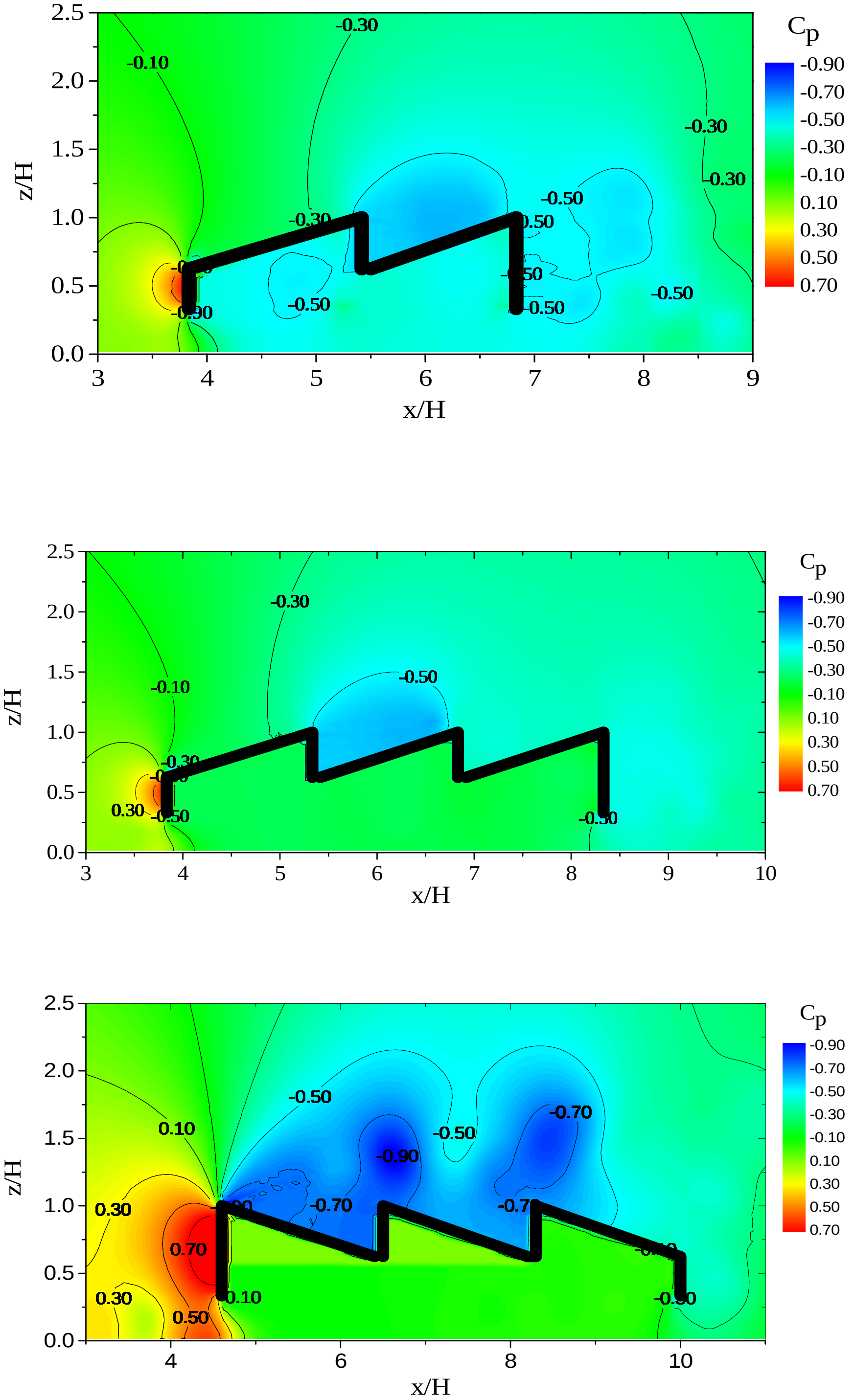

圖 8.單斜式溫室中心線上時間平均風壓係數分佈圖

(a)雙棟風向角 0^{o}；(b)三連棟風向角 0^{o}；(c)三連棟風向角 180^{o}

六、參考文獻

1. Bournet, P.-E. and T. Boulard. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. Computers and Electronics in Agriculture 74, 195-217.
2. Chu, C.-R. Chiu Y.-H., Chen Y.-J., Wang Y.-W., C.-P.Chou. 2009. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross ventilation. Building and Environment 44, 2064-2072.
3. Chu, C.-R., & Chiang, B.-F. 2013. Wind-driven cross ventilation with internal obstacles. Energy and Buildings, 67, 201-209.
4. Chu, C.-R., Lan, T.W.,Tasi, R.K.,Wu, T.R., C.K.Yang. 2017. Wind-driven natural ventilation of greenhouses with vegetation, Biosystem Engineering, In press.
5. Norton,T., Sun, D.W., Grant, J. Fallon, R., and V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics CFD in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industrial: A review. Bioresource Technology 98, 2386-2414.
6. Reichrath,S. and T.W. Davies. 2002. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. Agronomie 22, 3-19.
7. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Masaru, Y., T. Shirasawa. 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. J Wind EngIndAerodyn. 96, 1749-1761.